

博士學位論文

論文の内容の要旨
および
論文審査の結果の要旨

乙第 85 号

平成 27 年度

東京都市大学

序

本編は学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条による公表を目的として、平成27年度内に本学において博士の学位を授与した者の、論文内容の要旨および論文審査の結果の要旨を収録したものである。

氏 名（本籍）	鈴木 直子（東京都）
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	乙第 85 号
学位授与の日付	平成 27 年 6 月 18 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学 位 論 文 主 題	沈下モニタリングによる基礎構造の性能評価に関する研究
論 文 審 査 委 員	（主査） 教授 濱本 卓司 教授 西村 功 教授 末政 直晃 山田 眞（早稲田大学）

論文内容の要旨

建築分野でモニタリングというと、上部構造のヘルスマニタリングが思い浮かぶ。しかし、計測件数で見れば、基礎・地盤における実績の方がはるかに多い。これは、地盤物性の空間的ばらつきが大きく、上部構造に比べて挙動予測が難しいためである。

建築物の沈下計測も、構造安全性の確保、沈下対策効果の確認、沈下予測手法の高度化などを目的として、基礎形式に関わらず数多く実施されてきた。特に、建築物の設計が仕様設計から性能設計に移行しつつある昨今、基礎構造の沈下に関する性能評価は重要な検討事項になっている。例えば、関西国際空港などの若齢埋立地盤で採用された不同沈下修正機構を有する摩擦杭基礎では、従来のように支持杭だけに頼らず、沈下に対する要求性能に応じて合理的な基礎構造を採用し、沈下計測を積極的に導入して安全かつ合理的な基礎の設計に役立てている。

一方、建築物を取り巻く環境は、高度成長期のスクラップ・アンド・ビルドの時代から補強・補修をしながら長く使用する長寿命化の時代へと移行している。基礎構造に関しては、使用期間中における杭の支持力を評価するために、杭の損傷状態を地震時あるいは地震前後の振動計測等により推定する方法が提案されている。その一方、沈下を誘発する近隣地盤の掘削や地下水位低下による周辺環境の変化、地震後の残留変位など、沈下量の評価を重視する傾向も強まっている。今後は、支持力評価と沈下量評価を統合した構造ヘルスマニタリングの一分野として長期沈下モニタリングを実施する機会も増すと考えられる。

長期沈下モニタリングの信頼性と精度は、計測データの空間分解能と時間分解能に依存するため、センサの設置位置とデータ収集頻度をできるだけ密にすることが望ましい。しかし、施工性やコストを考えると、長期間にわたり高密度計測を行うことは容易ではない。特に竣工後は、人手とコストを極力抑えた計測および建築物の利用を妨げないことが求められる。

このような状況を踏まえて、本研究では、基礎構造の沈下挙動に関する性能評価のための実用的な沈下モニタリング手法を提案し、その適用性を検討した。提案法では、沈下計測と沈下解析を統合して用いる。まず実施可能な範囲で沈下計測を実施し、大局的な沈下挙動を把握する。その上で、沈下解析により計測データの空間分解能の粗さを補完し、計測だけでは把握しきれない局所的な沈下挙動を推定する。解析モデルは評価項目や要求精度に応じて選択する。一つの解析モデルで基礎全体にわたる沈下挙動の評価が難しい場合は、全体解析モデルと部分解析モデルを使い分ける。解析では、長期にわたる沈下挙動の変化を追跡するために、沈下の

進行に伴いモデル更新を行う。得られた沈下計測と沈下解析の結果に基づき、沈下挙動に関する基礎の構造性能を評価する。

提案法の適用性は、場所打ち節付き杭の実大載荷試験と、パイルド・ラフト基礎を有する超高層住宅と低層の大規模商業施設を対象に検討した。パイルド・ラフト基礎は杭と基礎スラブで荷重を支持する比較的新しい基礎形式である。杭の載荷試験では、パイルド・ラフト基礎という群杭を有する実建築物の沈下モニタリングに先立ち、単杭の沈下挙動への提案法の適用性を検討した。超高層住宅は即時沈下を生じる地盤上にあり、不同沈下と地震時の浮上りに対処するため、杭長の異なる場所打ち杭が採用されている。竣工までのモニタリングと性能評価を実施した。一方、大規模商業施設は長期的に沈下が進行する地盤上にあり、基礎スラブの柔性による局所的な沈下挙動が問題となる建築物である。施工中から竣工後2年にわたるモニタリングと性能評価を実施した。パイルド・ラフト基礎の沈下計測は国内外で数多く報告されているが、本論文の対象建築物のような特徴を有する事例は見受けられない。以上の検討により、提案法がパイルド・ラフト基礎の構造性能評価に有用であることを確認できた。パイルド・ラフト基礎は、杭基礎と直接基礎の支持機構を合わせ持つ。したがって、提案法は、杭基礎や直接基礎の構造性能評価に対しても有望である。

論文審査結果の要旨

近年、建築物の設計は仕様設計から性能設計に移行しつつあり、基礎構造の沈下に関する性能評価は重要な検討事項になっている。一方、建築物を取り巻く環境は、高度成長期のスクラップ・アンド・ビルドの時代から補強・補修をしながら長く使用する長寿命化の時代へと移行している。建築物の供用期間中には沈下を誘発する近隣地盤の掘削や地下水位低下による周辺環境の変化、用途変更に伴う荷重条件や許容沈下量の変化、地震後の残留変位など、沈下量の評価を重視する傾向も強まっている。

このような状況を踏まえて、本研究では沈下モニタリングによる基礎構造の性能評価を構造ヘルスマモニタリングの一分野として位置付け、沈下計測と沈下解析を統合した基礎構造の性能評価手法を提案した。提案法は、目視確認や高密度計測に頼らない実用的な手法である。提案法の適用性は、実大杭の載荷試験とパイルド・ラフト基礎を有する2つの実建築物を対象に検討した。

各章の内容は以下の通りである。

第1章では、研究の背景、研究の目的、および本論文の構成を示した。研究の背景では、維持管理における基礎構造の沈下モニタリングの現状と課題を整理した。従来、沈下障害に対しては障害発生後の事後対策が主であるが、沈下モニタリングは建築物の効率的な維持管理に有用であること、さらに維持管理のための実用的な性能評価手法の必要性について述べた。

第2章では、基礎構造の沈下に関わる性能評価を目的に沈下計測と沈下解析を統合した沈下モニタリング手法を提案した。提案法では、現実的に可能な範囲で沈下計測を実施して沈下挙動の概略を把握した上で、沈下解析によって計測データの空間分解能の粗さを補完し、沈下計測では把握しきれない局所的な沈下挙動を評価する。施工性やコストの問題から高密度計測は難しいことから、提案法は実用的な性能評価手法といえる。さらに、上部構造の安全性、機能性、および居住性の観点から新たに基礎構造の要求性能を整理し、各要求性能に対する性能評価指標とその許容値を設定した。

第3章では、場所打ち節付き杭の実大載荷試験に提案法を適用した。実建築物の群杭基礎の沈下モニタリングに先立ち、群杭の沈下挙動の基本となる単杭の沈下挙動への沈下計測の適用性を検討し、さらに沈下挙動を再現可能な解析モデルを見出した。埋設センサを用いた杭軸力と杭体変位の計測では、センサ本体および計測ケーブルによる杭の断面欠損の問題から、試験杭であっても高密度計測はできなかった。一方、3次元全応力解析を用いて節付き杭の沈下および引抜き挙動の再現と沈下メカニズムの解明が可能であることを確認できた。このことは、節付き杭を有する建築物で提案法による基礎構造の性能評価が有望であることを示している。

第4章では、硬質地盤上に建設されたパイルド・ラフト基礎を有する超高層集合住宅を対象に、実際の建築物への提案法の適用性を検討した。従来から行われている施工中のみの沈下計測であっても、沈下解析を併用して計測データを補完することにより、竣工後の性能評価で重要な基準の一つとなる竣工時の性能を十分評価できることを確認した。層別沈下計は、震度5程度の地震でも地震動の影響を受けて実際の沈下挙動とは異なる数値を示すことが分かった。したがって、地震による基礎構造の性能低下を精度良く評価するには、レベル計測など他のセンサと組み合わせた計測が望ましい。杭頭軸力に与える外気温の変化および基礎スラブの硬化熱の影響は大きく、杭頭軸力の評価では温度補正が必要であることを確認した。第3章で見出した場所打ち節付き杭の沈下および引抜き挙動を再現可能なモデル化手法は、即時沈下のみ問題となるパイルド・ラフト基礎の沈下挙動の再現にも有効であった。等価荷重面法によるパイルド・ラフト基礎の沈下解析は、地盤を弾性体としてモデル化し、杭長が比較的均一に近ければ、全体解析モデルとして有効であることを確認した。

第5章では、圧密沈下を生じる地盤上のパイルド・ラフト基礎を有する低層の商業施設を対象に提案法の適用性を検討した。施工開始から竣工後2年にわたる長期沈下モニタリングが施工時の即時沈下と圧密沈下の同時進行および使用時の圧密沈下の進行と収束状況の把握に有効であることを確認できた。杭本数が多いパイルド・ラフト基礎の沈下解析では、等価荷重面

法に基づく3次元全応力解析により基礎スラブの全体沈下挙動を把握した上で、2次元有効応力解析により局所沈下挙動を検討する段階評価が有効であった。沈下解析では、モデル更新により実測値と解析値との差異を低減しつつ、杭と地盤の荷重分担率や過剰間隙水圧の消散過程等の沈下メカニズムを考慮した基礎構造の性能評価が可能であることを確認できた。

第4章と第5章を通じて、建築物の規模および沈下の継続時間によらず、提案法がパイルド・ラフト基礎の沈下に関わる性能評価に有望であることを確認できた。パイルド・ラフト基礎は杭基礎と直接基礎の支持機構を合わせ持つ。よって、提案法は杭基礎や直接基礎に対しても有望と考えられる。

第6章では、各章のまとめを要約し論文の結論としている。

以上の沈下モニタリングによる基礎構造の性能評価に関する研究は、従来は上部構造で実施されていた構造性能評価を基礎構造の分野で実施した点に大きな特徴があるが、特に以下の点で新規性が認められる。(1) 上部構造の安全性、機能性、および居住性に着目した基礎構造の性能評価のための要求性能と評価指標を提案した。(2) 現実的に可能な範囲で実施した空間分解能が低い沈下計測と、その沈下計測の空間分解能を補完する目的での沈下解析を併用するモニタリング手法を提案し、その有効性を実建築物に適用することにより明らかにした。(3) パイルド・ラフト基礎の簡易沈下計算手法として等価荷重面法を提案し、その有効性を示した。これらの項目は、いずれも学位請求者による実大杭の載荷試験、実建物での沈下計測、および沈下解析に基づき十分な検証が行われており、信頼性の高い内容となっている。本論文は、構造工学と建築物の維持管理の分野に多大に寄与する内容であり、博士(工学)の学位論文として価値があると判断する。